干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.06.11

沙尘影响下华北地区一次重污染天气形成与消散过程分析①

张亚茹， 陈永金， 刘永芳， 刘志远， 刘永昌， 孙 童
（聊城大学环境与规划学院，山东 聊城 252059）

摘 要： 以 2017 年 5 月 4 日～5 日华北地区出现了一次大范围的严重的天气污染形成与消散过程为研究对象，通过搜集华北地区 9 个城市空气中主要污染物浓度、*AQI*（空气质量指数）和常规气象数据，分析 *AQI*、主要污染物（PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3）浓度变化特征和相关气象因子的关系。结果表明：本次重污染本质为区域性沙尘污染所致。污染过程呈现出形成速度快、消散急促的特点。该污染过程首要污染物为 PM_{10}，其次为 $PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3 等由人类活动产生的污染物浓度并未超标。后向轨迹分析和相关分析发现造成此次严重污染颗粒物主要来自蒙古高原，风是主要驱动因子。污染物在空间位置比较接近的城市间传输时，表现出趋势一致性、时间上的滞后性和污染物浓度的累积性特点。

关 键 词： 重污染天气；相关分析；PM_{10}；华北地区；后向轨迹分析

中图分类号： P445.4 **文献标识码：** A **文章编号**

随着城市化和工业化进程的加快，近年来我国空气质量不断下降，已引起社会广泛关注。2013—2014 年，京津冀区域空气污染形势严峻，全部地级以上城市中有半数以上长期处于污染状态且以颗粒物污染最为严重[1]。

华北地区春季沙尘天气频发[2]，沙尘天气是一种灾害性天气现象，不仅危害人类生产活动[3]，而且由此形成的沙尘气溶胶通过多种途径严重破坏生态环境[4]，污染大气环境[5]，危害人体健康[6]，严重影响了人们的生产生活。大气颗粒物重污染事件是沙尘天气最常见的危害之一，诸多大气重污染事件与沙尘天气的发生有关。近年来，国内外学者在沙尘天气造成的颗粒物污染方面进行了大量研究。李珊珊[7]等的研究表明，北京市 2015 年出现的沙尘天气导致空气质量急剧恶化；沙尘过境时 PM_{10}浓度明显上升，$PM_{2.5}$浓度受到的影响相对较小，SO_2、NO_2、CO 浓度变化不明显；沙尘回流时携带区域污染物进入北京，各项污染物及颗粒物组分浓度出现一定程度的上升。王汝佛[8]等对 2010 春季我国一次强沙尘暴过程进行分析，沙尘天气先从西向东、而后从北向南依次影响我国，造成了我国 21 个省（区、市）空气质量下降。张宝林[9]等研究呼和浩特空气质量变化，沙尘天气引起空气质量急剧下降，出现严重污染，沙尘高空远距离输送是导致呼和浩特市空气质量显著下降的重要原因。

专家学者也从不同角度对大气污染问题及治理做了多方面研究，在重污染天气形成与消散过程方面，吴莹[10]等对北京及河北三城市夏秋季节大气污染研究发现，石家庄市由颗粒物造成的大气污染最为严重，保定、涿鹿、北京等城市依次递减；受大城市北京和石家庄的双重影响，保定地区大气二次污染物臭氧浓度最高，其次为涿鹿、石家庄，北京最低。许万智[11]等对 2014 年 2 月华北地区的一次污染过程研究结果表明，华北地区重污染天气主要污染物为 $PM_{2.5}$。

虽然有关华北地区重污染天气研究不少，但其形成与消散特征的研究不多，主要污染物和非主要污染物在污染过程中浓度各呈怎样变化的研究还不

① **收稿日期：** 2018－06－28； **修订日期：** 2018－10－11
基金项目： 国家科技支撑计划项目（2014BAC15B02）；国家自然科学基金（40871239，40901276）；国家级大学生创新项目（201710447049）；聊城大学大学生科技创新项目（26312171003）资助
作者简介： 张亚茹（1995－），女，学士，主要从事自然地理等方面的研究. E-mail：yazhangru@163.com
通讯作者： 陈永金. E-mail：chenyongjin@lcu.edu.cn

多见。2017 年 5 月 4 ~ 5 日华北地区出现今年以来强度最强范围最大的一次浮尘及扬沙天气过程，此次过程对华北地区的空气质量造成了严重的影响。本研究以北京、廊坊、天津、保定、沧州、石家庄、德州、邢台和邯郸 9 个城市 *AQI* 和主要污染物 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3 浓度变化以及气温、气压、风速风向、相对湿度和降水量等气象因子数据资料为基础，分析重污染天气形成与消散过程特征及各污染物浓度的变化，为大气治理提供科学参考。

1　数据搜集与研究方法

1.1　数据搜集

本研究所用的 *AQI*、PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2、CO、O_3 浓度等污染指标数据通过空气质量在线监测平台（https://www.aqistudy.cn/）搜集，气温、气压、风速风向、相对湿度和降水量等气象因子数据采自中国气象数据网（http://data.cma.cn/site/index.html），采集时间段为 2017 年 5 月 4 日 3:00 到 5 日 19:00 华北地区北京、廊坊、天津、保定、石家庄、沧州、德州、邢台和邯郸空气质量从良好到严重污染再到良好的时段，频率为每小时一次。

1.2　研究方法

AQI 等级划分法：*AQI* 是定量描述空气的无量纲指标，综合考虑了 SO_2、NO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、CO 和 O_3 6 项污染物的污染情况，可以反映某一地区某一时间段的空气质量水平[12]。目前我国将 *AQI* 分为 6 级，0 ~ 50 定为 1 级，表示空气质量优；50 ~ 100 为 2 级，空气质量为良，当 *AQI* 值超过 300 时，表示空气达到严重污染。

相关分析法：运用相关分析中的非参数相关分析各因子之间的相关性，揭示导致 *AQI* 变化的主要污染物。

PCA 主成分分析：采用主成分分析法，对气压、气温、风速、降水、空气湿度 5 种气象因子数据进行分析计算，主成分分析可以准确识别出气象因子中起主导作用的成分，该结果有助于为环保部门的治理工作提供依据。

后向轨迹分析：HYSPLIT（Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model）即拉格朗日混合单粒子轨道模型。HYSPLIT－4 模型是由美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的空气资源实验室和澳大利亚气象局联合研发的一种用于计算和分析大气污染物输送、扩散轨迹的专业模型。选取北京、天津、德州和邯郸 4 个城市为终点，分析气团移动轨迹。

2　结果与分析

2.1　*AQI* 变化特征

2017 年 5 月 4 日 3:00 ~ 5 日 19:00，北京、天津、石家庄等 9 个城市 *AQI* 值大都从 100 左右跃升到 500。其中，北京是遭受此次污染最早的城市，在 5 月 4 日 3 时 *AQI* 为 60，4 时升至 332，5 时达到 500，并维持该值长达 29 h。廊坊、天津、保定、石家庄、沧州、德州、邢台和邯郸这 8 个城市在紧随北京之后，依次进入重污染状态。邯郸出现重度污染的时间最晚，为 5 月 4 日 12 时。重污染结束的城市顺序与开始的顺序大致相同，北京在 5 月 5 日 9 时最先结束，而邯郸在 5 月 5 日 16 时最后结束，这一次重污染天气过程 9 个城市持续了 30 h。5 月 5 日 19 时，9 个市的 *AQI* 都降到了 130 以下，京津冀地区重污染天气过程结束。相比平时的污染过程，此次污染结束过程 *AQI* 下降较为明显，历时较短（表 1）。

2.2　主要污染物浓度变化

为了进一步明确导致 *AQI* 急剧变化的主要污染物，我们将 *AQI* 值与各污染物指标进行了相关性分析，结果表明 *AQI* 值与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 呈极显著相关，与 SO_2，NO_2 呈显著相关，与 CO、O_3 相关性不显著（表 2）。可见，颗粒物是本次京津冀地区重污染天气过程的主要污染物质。

图 1a 是京津冀 9 个城市空气中 PM_{10} 的变化，5 月 4 日 3 时，9 个城市的 PM_{10} 都在 100 以下，但从 4 时开始，北京就迅速上升达到 445 $\mu g \cdot m^{-3}$。随后其他城市也迅速上升，这 9 个城市的 PM_{10} 最高值都超过了 1 000 $\mu g \cdot m^{3}$。北京、廊坊、天津、保定、沧州、石家庄、德州、邢台和邯郸的峰值分别是 1 000 、1 699 、1 843 、1 938 、1 676 、1 482 、2 003 、1 174 $\mu g \cdot m^{-3}$ 和 1 387 $\mu g \cdot m^{-3}$。5 月 5 日 10 时北京市空气中 PM_{10} 浓度急剧下降，河北石家庄在 11 时，河北廊坊在 5 月 5 日 12 时开始下降，天津则在 13 时开始下降，结束最晚的邯郸则在 5 月 5 日 17 时下降到 300 以下。$PM_{2.5}$（图 1b）升高的幅度没有 PM_{10} 升高幅度大，但也比正常值高很多。PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 有大部分来自沙尘源和道路扬尘、建筑扬尘等扬尘源，沙尘污染为自然污染，扬尘污染多为人为污染，体现在

表 1　2017 年 5 月 4～5 日京津冀地区 9 个城市 *AQI* 逐时变化

Tab. 1　*AQI* hourly variation of 9 cities in north China from May 4 to 5, 2017

		北京	廊坊	天津	保定	石家庄	沧州	德州	邢台	邯郸
5.4	3:00	60	53	52	109	72	52	68	87	49
	4:00	332	67	55	100	97	74	51	62	107
	5:00	500	69	64	109	89	74	52	63	109
	6:00	500	178	72	120	85	75	52	65	109
	7:00	500	500	79	118	84	87	42	73	115
	8:00	500	500	150	128	149	79	52	69	127
	9:00	500	500	500	500	500	79	52	69	109
	10:00	500	500	500	500	500	500	243	169	111
	11:00	500	500	500	500	500	500	500	248	192
	12:00	500	500	500	500	500	500	500	456	394
5.5	9:00	500	500	500	500	500	500	500	493	279
	10:00	235	500	500	500	500	500	500	500	342
	11:00	127	500	500	200	429	500	500	483	500
	12:00	92	124	500	137	218	450	500	353	500
	13:00	83	270	206	84	136	147	500	188	456
	14:00	126	183	98	59	100	98	305	130	399
	15:00	95	88	77	59	78	70	157	96	354
	16:00	63	59	69	37	67	66	155	105	256

表 2　*AQI* 值与各污染物指标的 Spearman's 相关

Tab. 2　Spearman's rho between *AQI* and related indices of atmospheric pollution

	AQI	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2
$PM_{2.5}$	0.891(**)					
PM_{10}	0.900(**)	0.909(**)				
SO_2	0.147	0.013	0.176(*)			
CO	0.038	-0.030	0.084	0.644(**)		
NO_2	0.148(*)	0.083	0.139	0.519(**)	0.599(**)	
O_3	-0.067	-0.038	-0.043	-0.471(**)	-0.562(**)	-0.874(**)

注:"**"为 0.01 显著水平,"*"为 0.05 显著水平

$PM_{10}/PM_{2.5}$的值较小,通常低于 50%。本次沙尘污染过程中,$PM_{10}/PM_{2.5}$的值北京为 0.435,其他其余 8 个城市的比值都在 0.243～0.278 之间,均小于 0.5,说明本次污染属于沙尘污染[13]。

9 个城市的 SO_2 浓度(图 1c)在重污染期间未超过国家一级标准(150 μg · m^{-3}),而 CO 浓度(图 1d)在重污染期间未超过国家一级标准(10 mg · m^{-3}),未达到污染的程度。CO 和 SO_2 的变化趋势相一致,并且他们之间的相关系数为 0.644,在 0.01 水平上呈显著相关,可以看出 CO 和 SO_2 同源。9 个城市的 NO_2 浓度(图 1e)和 O_3(图 1f)浓度在 2017 年 5 月 4 日 3:00～5 月 5 日 19:00 均未超过国家二级标准(NO_2 为 200 μg · m^{-3};O_3 为 160 μg · m^{-3}),未达到污染的程度。

综上所述,颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度升高,而 SO_2 和 NO_2 等气态污染物浓度下降,当沙尘性空气污染发生时,常常伴有大风天气,造成当时的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等颗粒物浓度骤然升起,同时大风对 SO_2 等气态污染物浓度具有稀释作用,所以颗粒物对此次污染的影响较大,而气态污染物均未达到污染水平。

2.3　重污染天气与气象因子关系

利用主成分分析常规气象因子对本次污染的贡献,使我们能从气象因子中来识别出起主导作用的成分。其中方差贡献率反应的是某主成分提取原始污染信息的权重,其方差贡献率越大,表明该主成分的污染贡献率越大,主成分的累计方差贡献率表明取前几个主成分基本包含了全部测量指标所具有污染信息的百分率。以北京市为例,北京市大气降尘污染物主成分分析初始特征值及贡献率见表 3。第一、第二、第三主成分特征值(表 3)对总方差贡献率分别为 45.135 %、32.634 % 和 17.258 %,其余成分对总方差贡献率占4.97%。前3个主成分累

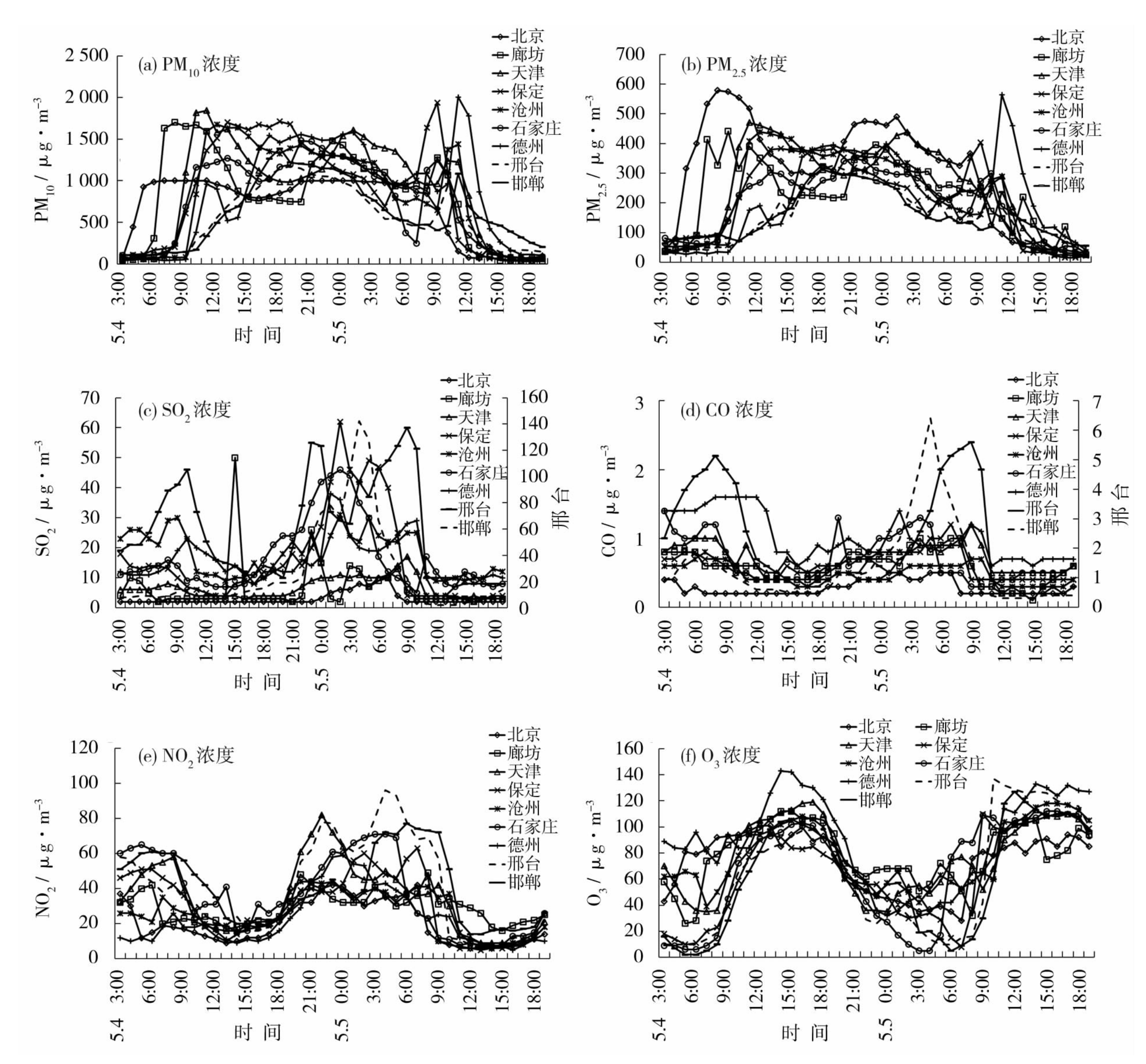


图1 2017年5月4~5日京津冀地区9个城市大气污染物浓度变化特征

Fig. 1 Concentration variation characteristics of air pollutant in 9 cities on May 4 to 5, 2017

表3 主成分分析初始特征值及贡献率

Tab. 3 Principal component analysis, initial eigenvalue and contribution rate

因子	1	2	3	4	5	6
初始特征值	2.708	1.958	1.035	0.190	0.094	0.014
方差贡献率 / %	45.135	32.634	17.258	3.174	1.569	0.231
累积方差贡献 / %	45.135	77.769	95.027	98.201	99.769	100.000

注:提取方法:主成份分析

积方差贡献率95.03%(>95%),已经足以代替众多污染信息进行污染物识别。

主要污染物识别是通过大气降尘中污染物对总方差的贡献率即主成分载荷(表4)进行分析。载荷值反映的是主成分与变量的相关系数,其中载荷大的认为是重要污染因子,主成分载荷表达式为:$F1$ = 0.970风速 - 0.104气温 - 0.147气压、$F2$ =

表4 主成分载荷矩阵

Tab. 4 Principal component load matrix

气象因子	成份		
	一	二	三
风速 / $m\cdot s^{-1}$	0.970	-0.150	0.088
气温 / ℃	-0.104	-0.911	0.340
气压 / hPa	-0.147	0.941	0.124

0.941 气压 -0.150 风速 -0.911 气温、$F3=0.088$ 风速 +0.340 气温 +0.124 气压。可见,第一主成分主要与风速有关,第二主成分与气压相关,第三主成分与气温相关。

实际上,风、气压和气温之间的密切相关的,也可以说是一个问题的不同方面。因此我们从风速、风向两个方面作进一步分析。9 个城市平均风速在在 2 ~4.6 m·s^{-1}之间,廊坊的最大风速在 9 个城市中最小,邢台最大(图 2),由此可见,这次严重污染与大风作用密切相关。

从风向看(图 3),9 个城市的风向多为 N、NW、W 和 SW,个别城市出现 NE,E 和 SE。5 月 4 日颗粒污染物浓度开始迅速上升时多数城市主要盛行北风、西北风,然后逐渐转变为西风、西南风、南风。

2.4 污染源与传输路径分析

后向轨迹模式采用 NOAA(美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室)开发的 HYSPLIT 模型。HYSPLIT 模型具有处理多种气象输入场,多种物理过程和不同类型排放源的较完整的输送、扩散、沉降的综合模式系统[15]。

图 4 展示了 5 月 5 日 10:00 到达北京、天津、德州和邯郸的气团后向轨迹。设定后向轨迹分析的时间为 72 h,轨迹高度分别选取 500、1 000、1 500 m。可以看出,研究时段京津冀地区均受到来自西北方向冷气团的影响,72h前沙尘主要集中在1500m

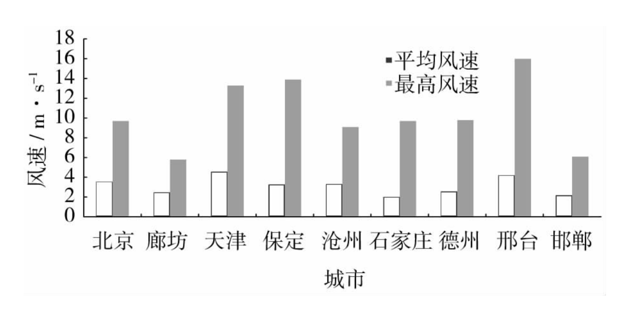


图 2 华北地区 9 城市 5 月 4 ~5 日严重污染天气过程中平均风速与最高风速图

Fig. 2 Average wind speed and highest wind speed of 9 cities in North China during May 4 to 5

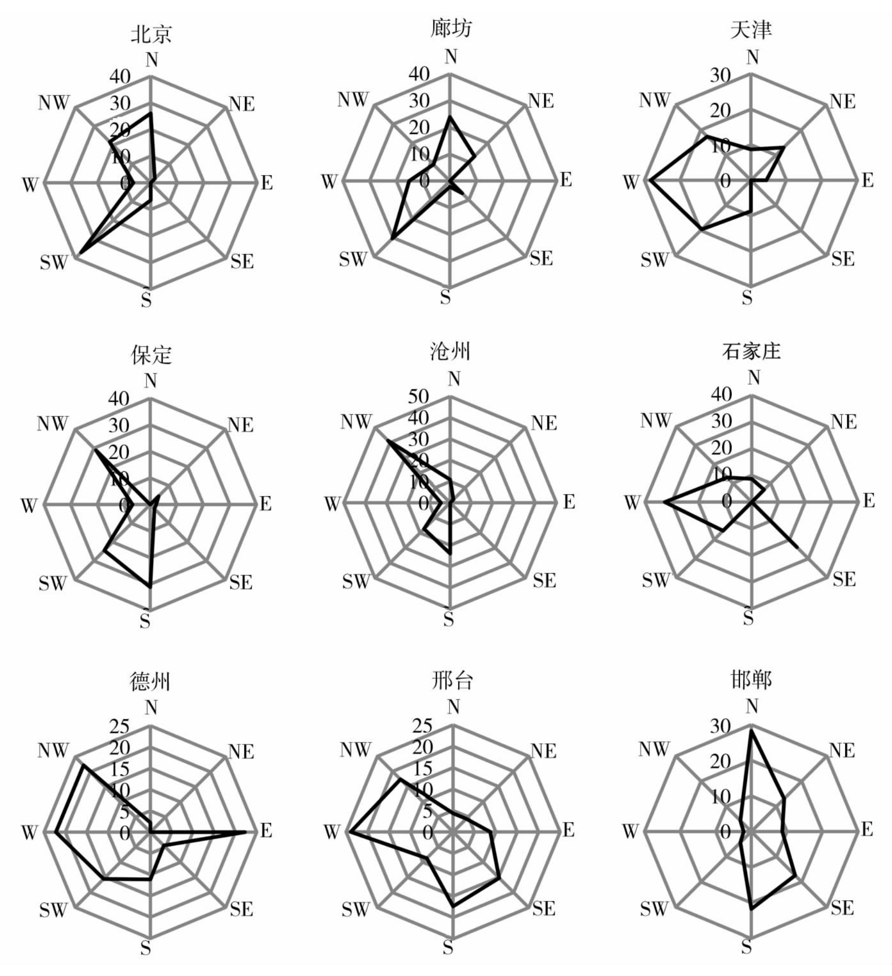


图 3 2017 年 5 月 4 ~5 日 9 个城市风速风向频率(%)玫瑰图

Fig. 3 Wind speed (%) and direction diagram of nine cities from May 4 to 5, 2017

上的高空，向华北地区输送的过程中逐步下沉。结果表明，本次沙尘污染天气主要起源于蒙古国南部和内蒙古中西部，气团向东南方向移动，给我国华北地区带来了沙尘污染。

形成于蒙古高原的反气旋在到达一个城市（或地区）之初，反气旋中心尚在该城北或北偏西方向，因此盛行北风或偏北风，当反气旋中心穿过城市向南或东南方向前进时，该城市就会在偏南风甚至南风的控制之下，这就是此次严重污染天气过程中9个城市风向不断变化的原因所在。

为了进一步明晰污染物在不同城市间的传输情况，将9个城市大气中 PM_{10} 浓度进行相关性分析，结果发现，地理位置比较接近的城市间 PM_{10} 浓度值相关性要比较远的城市间相关性更显著（表5）。例如，北京市和廊坊空气中 PM_{10} 的浓度呈极显著正相关，与天津市呈显著相关。距离北京最远的邢台和邯郸两市 PM_{10} 的浓度和北京市的相关性在统计意义上不具有显著性，而邢台和邯郸之间则达到极显著相关。

将北京、廊坊和天津三市空气中 PM_{10} 变化绘制成图5，从图中可以看出从北京到天津 PM_{10} 浓度急剧上升表现出明显先后顺序，最高值也是从北京到天津依次增加。在此严重污染过程三市 PM_{10} 浓度升降变化也较为一致。由此可以推测，三城市 PM_{10}

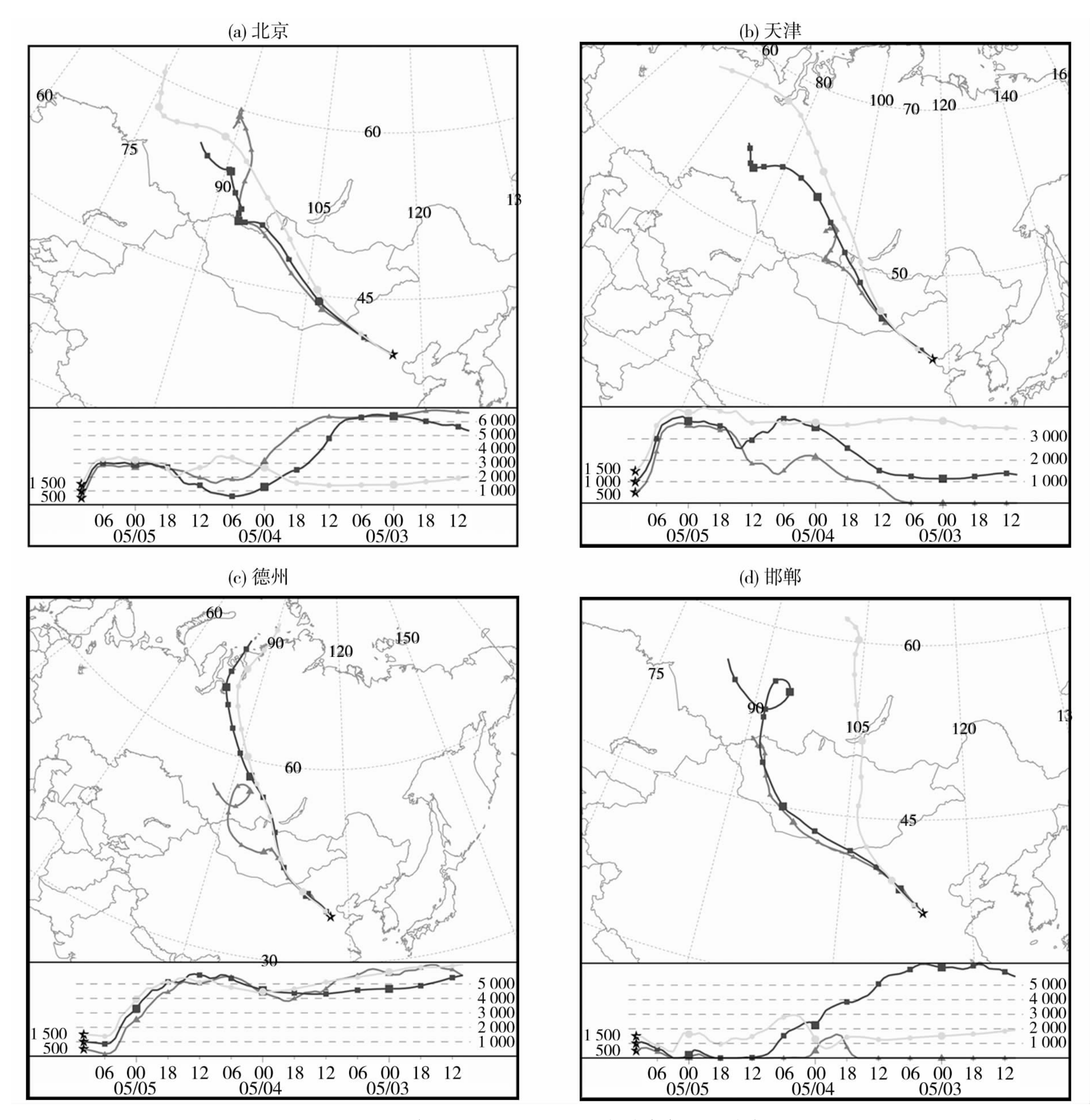


图4 2017年5月5日10:00 4个城市气团后向轨迹

Fig. 4 Backward trajectory of 4 cities air mass at 10:00 on May 5, 2017

表 5　基于空气中 PM_{10} 浓度的 9 城市相关性分析

Tab. 5　Spearman's rho correlations among 9 cities based on the density of PM_{10} in atmosphere

	北京	廊坊	天津	保定	沧州	石家庄	德州	邢台
廊坊	0.622(**)							
天津	0.491(*)	0.512(*)						
保定	-0.608(**)	-0.317	-0.377					
沧州	-0.061	-0.209	0.274	0.478(*)				
石家庄	0.490(*)	0.418	0.113	0.312	0.368			
德州	0.499(*)	0.018	-0.150	-0.134	0.014	0.351		
邢台	0.208	-0.199	-0.172	0.401	0.542(**)	0.570(**)	0.678(**)	
邯郸	0.255	-0.256	-0.149	0.220	0.448(*)	0.385	0.754(**)	0.944(**)

注:“**”为 0.01 显著水平,“*”为 0.05 显著水平

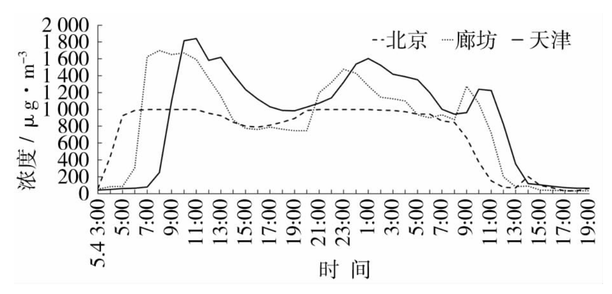


图 5　北京、廊坊与天津空气中 PM_{10} 含量变化比较

Fig. 5　Comparison of PM_{10} in atmosphere among Beijing, Langfang and Tianjin

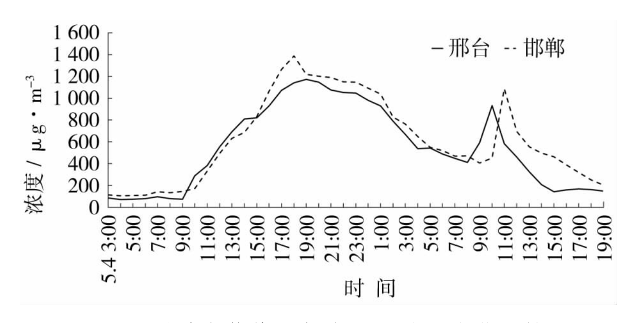


图 6　邢台与邯郸空气中 PM_{10} 含量变化比较

Fig. 6　Comparison of PM_{10} in atmosphere between Xingtai and Handan

污染物具有同源性,且从北京到天津具有累积效应。邢台和邯郸 PM_{10} 浓度表现出极显著相关性,其变化过程与趋势及其浓度高低进一步印证其同源性和累积性(图 6)。

由此可见,空间距离较近的城市 PM_{10} 浓度大都呈显著或极显著正相关,空间距离较远的城市或者呈负相关,或相关性不显著。

3　讨 论

有关华北地区的大气污染问题,学者们进行了大量研究[16-18],像这次以污染迅速积聚形成严重污染,然后又快速消散的情形比较少见。

研究表明,重污染天气的形成受人为因素和气象因素共同作用[18-20]。人为因素主要表现为经济社会活动过程向大气中大量排放 SO_2、NO_2 等污染物, 2017 年 5 月 4 ~ 5 日的严重污染过程中,硫化物、氮氧化物等并未超标,污染主要是颗粒物严重超标造成的。对污染物传输分析结果表明,这些颗粒物主要来自蒙古高原,即华北地区此次重污染过程是受来自西北地区的扬尘输送天气的影响,这进一步说明天气气候背景对重污染过程的形成、维持和消亡起着重要作用[17,21]。

华北地区 9 个代表性城市 PM_{10} 浓度变化既有相似性,又有差异性。相似性表现为在冷高压影响下,大气中颗粒物浓度迅速飙升,下降速度也非常快。差异性表现为 9 个城市受冷高压反气旋影响的先后顺序与其地理位置紧密相关。位置靠北靠西的城市首先受到影响,结束得也早。位置偏南偏东的城市表现出明显迟滞效应。另外,地理位置比较接近的城市污染物浓度变化节奏更加一致,且距离污染物源地较远的城市表现出对污染物的累积效应。

本次大气污染受气象条件的影响明显,风速是影响重污染天气形成与消散的重要气象要素。静风或风力较小时,有利于维持空气的静稳条件,不利于污染物的输送与扩散,有利于重污染天气的形成与维持[11,22-23]。风力较大时,空气污染物会随风力传送,有利于重污染天气的消散[23]。而本次华北地区的严重污染过程中既有 6 级左右的强风,也有 3 级左右的微风,强风把污染物从蒙古高原输送过来,也使污染物沿着冷高压前进路径带往下一个目的地,使此次严重污染过程形成迅速,消散得也快。而 3 级左右的微风则让污染物在一个地区保持在一定浓度,本研究中无论是北京市还是邯郸市 *AQI* 值大于

500 的时间都超过 28 h。

污染物在地域间的流转对重污染天气有着重要作用,其他地区产生的空气污染物会随大气环流等气象要素输送到京津冀及周边地区,污染物的输送是造成京津冀及周边地区的空气污染的一个原因[11,24-25],本研究进一步证明了该观点。

4 结 论

通过对此次以京津冀为代表的华北地区重污染天气形成与消散过程研究,得出以下结论:

(1) 2017 年 5 月 4~5 日出现的污染天气主要污染物是外源性的 PM_{10}、SO_2、NO_2 等人类活动造成的污染物都处于较低水平。沙尘天气是本次华北地区重污染形成的气象条件,污染物的输送通道是在蒙古高原冷高压作用下形成的西北气流。

(2) 此次污染具有程度严重,影响区域大的特点。主要污染物 PM_{10} 在 9 个城市的峰值都达到了 1 000 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上,且持续时间都在 20 h 以上。

(3) 受沙尘天气的影响,华北地区 9 个城市空气中的 PM_{10} 为代表的主要污染物浓度变化表现出受沙尘影响初期污染物浓度迅速飙升,在沙尘天气影响污染物浓度居高不下,随着沙尘天气的结束污染物浓度迅速下降的特点。

(4) 在西北气流影响作用下,处在华北地区偏北偏西的城市首先受到沙尘的影响,位置靠东靠南的城市受沙尘影响表现出迟滞性特点。另外,空间位置比较接近的城市间污染物浓度变化表现出明显的趋势一致性和时间上的迟滞性以及污染物累积的特点。

参考文献(References)

[1] 高愈霄,霍晓芹,闫慧,等. 京津冀区域大气重污染过程特征初步分析[J]. 中国环境监测,2016,32(6):26-35. [GAO Yuxiao, HUO Xiaoqin, YAN Hui, et al. Preliminary analysis on the characteristics of heavy air pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Monitoring in China,2016,32(6): 26-35.]

[2] 陈豫英,陈楠,谭志强,等."2013.3.9"宁夏强沙尘暴天气的热力动力条件分析[J]. 干旱区地理,2016,39(2):285-293. [CHEN Yuying, CHEN Nan, TAN Zhiqiang, et al. Condition analysis of thermal and dynamical characteristics of heavy dust storm in Ningxia on March 9, 2013[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2):285-293.]

[3] 孙辉,晏利斌,刘晓东. 中国北方一次强沙尘暴爆发的数值模拟研究[J]. 干旱区地理,2012,35(2):200-208. [SUN Hui, YAN Libin, LIU Xiaodong. Numerical simulation of a severe dust-storm outbreak in northern China[J]. Arid Land Geography,2012, 35(2):200-208.]

[4] 沈洁,李耀辉,朱晓炜. 西北地区气候与环境变化影响沙尘暴的研究进展[J]. 干旱气象,2010,28(4):467-474. [SHEN Jie, LI Yaohui, ZHU Xiaowei. Influence of climate and enviroment change on dust storm in northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology,2010,28(4):467-474.]

[5] 陈跃浩,高庆先,高文康,等. 沙尘天气对大气环境质量影响的量化研究[J]. 环境科学研究,2013,26(4):364-369. [CHEN Yuehao, GAO Qingxian, GAO Wenkang, et al. Quantitative research on sandstorm effects on environmental air quality[J]. Research of Environmental Sciences,2013,26(4):364-369.]

[6] KHANIABADI Yusef Omidi, DARYANOOSH Seyed Mohammad, AMRANE Abdeltif, et al. Impact of middle eastern dust storms on human health[J]. Atmospheric Pollution Research,2016.

[7] 李珊珊,潘涛,闫静,等. 2015 年春季北京市一次沙尘天气过程分析[J]. 环境科学与技术,2016,39(4):137-143. [LI Shanshan, PAN Tao, YAN Jing, et al. Analysis of a sand dust weather process in Beijing in spring 2015[J]. Environmental Science & Technology,2016,39(4):137-143.]

[8] 王汝佛,冯强,尚可政. 2010 春季我国一次强沙尘暴过程分析[J]. 干旱区地理,2014,37(1):31-44. [WANG Rufo, FENG Qiang, SHANG Kezheng. A severe sand-dust storm over China in the spring of 2010[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1):31-44.]

[9] 张宝林,张璟霞,郭帅. 沙尘天气过程对呼和浩特市空气质量的影响[J]. 环境科学与技术,2017,40(6):165-170. [ZHANG Baolin, ZHANG Jingxia, GUO Shuai. Effects of aeolian dust on air quality in Hohhot[J]. Environmental Science & Technology ,2017,40(6):165-170.]

[10] 吴莹,吉东生,宋涛,等. 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究[J]. 环境科学,2011,32(9):2741-2749. [WU Ying, JI Dongsheng, SONG Tao, et al. Characteristics of atmospheric pollutants in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang during the period of summer and autumn[J]. 2011,32(9):2741-2749.]

[11] 许万智,朱春涛,陈仲榆,等. 华北地区一次重污染天气的气象变化过程分析[J]. 中国环境监测,2015,31(6):34-40. [XU Wanzhi, ZHU Chuntao, CHEN Zhongyu, et al. The comprehensive analysis of a heavy air pollution episode in North China region in February,2014[J]. Environmental Monitoring in China,2015,31(6):34-40.]

[12] 潘本锋,李莉娜. 环境空气质量指数计算方法与分级方案比较[J]. 中国环境监测,2016,32(1):13-17. [PAN Benfeng, LI Lina. Comparison of the calculating method and classifying program

of air quality index among some countries[J]. Environmental Monitoring in China,2016,32(1):13 - 17.]

[13] 谷超.新疆环境空气中 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值特征分析[J].干旱环境监测,2017,31(2):70 - 74.[GU Chao. Analysis of $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio in Xinjiang ambient air[J]. Arid Environmental Monitoring,2017,31(2):70 - 74.]

[14] 李思川,史凯,刘春琼,等.夏季 NO_2 与 O_3 相互作用的时间尺度特征——以香港地区为例[J].环境化学,2015,34(2):299 - 307.[LI Sichuan,SHI Kai,LIU Chunqiong,et al. Temporal scaling characteristics of the cross-correlation between nitrogen dioxide and ozone: A case study of Hong Kong area[J]. Environmental Chemistry,2015,34(2):299 - 307.]

[15] 孔珊珊,刘厚凤,陈义珍.基于后向轨迹模式的北京市 $PM_{2.5}$ 来源分布及传输特征探讨[J].中国环境管理,2017,9(1):86 - 90.[KONG Shanshan,LIU Houfeng,CHEN Yizhen. Discussion on the source distribution and transmission characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing based on backward trajectory model[J]. Chinese Journal of Environmental Management,2017,9(1):86 - 90.]

[16] 张恒德,吕梦瑶,张碧辉,等.2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J].环境科学学报,2016,36(12):4340 - 4351.[ZHANG Hengde,LV Mengyao,ZHANG Bihui,et al. Analysis of the stagnant meteorological situation and the transmission condition of continuous heavy pollution course from February 20 to 26,2014 in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(12):4340 - 4351.]

[17] 周兆媛,张时煌,高庆先,等.京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J].资源科学,2014,36(1):191 - 199.[ZHOU Zhaoyuan,ZHANG Shihuang,GAO Qingxian,et al. The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region and trend analysis[J]. Resources Science,2014,36(1):191 - 199.]

[18] 蔡子颖,韩素芹,汪靖,等.基于天气背景天津地区重污染天气特征分析[J].环境科学学报,2017,37(10):3906 - 3917.[CAI Ziying,HAN Suqin,WANG Jing,et al. Analysis of synoptic characteristics of heavy pollution in Tianjin based on weather background[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(10):3906 - 3917.]

[19] 张小玲,唐宜西,熊亚军,等.华北平原一次严重区域雾霾天气分析与数值预报试验[J].中国科学院大学学报,2014,31(3):337 - 344.[ZHANG Xiaoling,TANG Yixi,XIONG Yajun,et al. Analysis and numerical forecast of a regional for-haze in North China Plain[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences,2014,31(3):337 - 344.]

[20] 赵克明,李霞,卢新玉,等.峡口城市乌鲁木齐冬季大气污染的时空分布特征[J].干旱区地理,2014,37(6):1108 - 1118.[ZHAO Keming,LI Xia,LU Xinyu,et al. Wintertimetemporal-spatial distribution characteristics of air pollutants in mountain gap town Urumqi[J]. Arid Land Geography,2014,37(6):1108 - 1118.]

[21] 高庆先,李亮,马占云,等.2013—2016年天气形势对北京秋季空气重污染过程的影响[J].环境科学研究,2017,30(2):173 - 183.[GAO Qingxian,LI Liang,MA Zhanyun,et al. The impacts of synoptic situation on heavy pollution process in autumn in Beijing during 2013—2016[J]. Research of Environmental Sciences,2017,30(2):173 - 183]

[22] 吴占华,任国玉,徐卫丽,等.我国北方沙尘天气的气候成因分析[J].干旱区地理,2011,34 (3):429 - 435.[WU Zhanhua,REN Guoyu,XU Weili,et al. Climatic controls of dust storm events in northern China[J]. Arid Land Geography,2011,34(3):429 - 435.]

[23] 孙玫玲,韩素芹,姚青,等.天津市城区静风与污染物浓度变化规律的分析[J].气象与环境学报,2007,23(2):21 - 24.[SUN Meiling,HAN Suqin,YAO Qing,et al. Analysis of calm wind and its relationship with pollutant concentration in Tianjin[J]. Journal of Meteorology and Environment,2007,23(2):21 - 24.]

[24] 霍彦峰,邓学良,杨关盈,等.传输指数在合肥市重污染过程中的应用分析[J].环境科学学报,2017,37(4):1277 - 1286.[HUO Yanfeng,DENG Xueliang,YANG Guanying,et al. Application of transport index for heavy air pollution in Hefei during winter in 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiate,2017,37(4):1277 - 1286.]

[25] ZHAO X J,ZHAO P S,XU J,et al. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2013,13(1):903 - 933.

Formation and dissipation processes of a severe atmospheric pollution in north China under the influence of dust

ZHANG Ya-ru, CHEN Yong-jin, LIU Yong-fang, LIU Zhi-yuan, LIU Yong-chang, SUN Tong

(*School of Environment and Planning*, *Liaocheng University*, *Liaocheng* 252059, *Shandong*, *China*)

Abstract: Air quality has been widely concerned for it exerts great influences on the people's health as well as the quality of their living environment. The more and more frequent and severe atmospheric pollution occurred in North China has brought lots of worries and concerns. To curb atmospheric pollution, we should have a clear understanding of its formation, dissipation process and its influencing factors. Based on data of pollutants (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, CO, O_3), *AQI* (air quality index), and meteorological data of 9 cities (Beijing City, Tianjin City, Langfang City, Shijiazhuang City, Baoding City, Xingtai City, Cangzhou City, Dezhou City, Handan City) collected from Chinese Meteorologic website, using research methods of Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) and Principal Component Analysis (PCA), we chose a severe atmospheric pollution happened from May 4 to May 5, 2017 in North China as an example to discuss the variations in pollutant concentration, the source and transportation of pollutants, meteorologic factors that governed the pollution. The results show as follows: (1) the pollutant of PM_{10} was the major pollutant, and it was exogenous, the pollutants such as SO_2, NO_2 that related closely to human activities remained at a low level. Sand dust weather was the meteorological condition for the heavy pollution in North China. The transport channel of pollutants was the Northwest Airflow resulted from the cold anticyclone in Mongolia Plateau. (2) This atmospheric pollution was very serious, which has great influence on the region. The concentration of PM_{10} was as high as 1 000 g · m^{-3} in all of the 9 cities, and lasted over 20 hours. (3) Under the influence of sand dust weather, the processes of formation and dissipation of pollution presented the characteristics of forming sharply and dissipating rapidly. (4) Under the influence of the northwest airflow, the cities in the north and west of this region were affected by sand dust earlier than those in the south and east. In addition, the concentration of pollutants in cities with close spatial locations showed obvious consistent trend and time lag, as well as the characteristics of pollutant accumulation.

Key words: heavy atmospheric pollution; correlation analysis; PM_{10}; North China; backward trajectory analysis